



ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 550.3+551.34

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-408-423>



Гидротермические условия почвы южного и северного склонов северо-восточного Дасинъаньлина, Китай

Мяо Юй^а, Надежда Анатольевна Павлова^б, Чанлэй Дай^с

^аСеверо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

^бИнститут мерзлотоведения им П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

^сХэйлуцзянский университет, г. Харбин, Китай

Автор, ответственный за переписку: Павлова Надежда Анатольевна, pavlova@mpi.ysn.ru

Резюме. Цель представленного исследования состояла в изучении особенностей влияния полярно ориентированных склонов на приповерхностный энергетический и гидротермический баланс в области сезонной криолитозоны. Авторами был проведен комплекс полевых исследований, включающий наблюдения за температурой воздуха и подстилающей поверхностью, влажностью грунтов, солнечной радиацией и скоростью ветра на гидрологических станциях Сунлин (южный склон) и Логухэ (северный склон) в северо-восточной части горной системы Дасинъаньлин (Китай). Анализ полученных материалов позволил установить, что, с одной стороны, долгосрочное влияние составляющих теплового баланса приводит к значительным отличиям структуры грунта и его свойств на разноориентированных склонах. Количество суточных циклов промерзания – оттаивания почвы на южном склоне (100 циклов) значительно превышает их на северном (56 циклов). Почва на южном склоне теплее, чем на северном на 3 °С, а ее влажность в районе станции Сунлин ниже, чем на станции Логухэ. С другой стороны, различия свойств почвы контролируют энергообмен между атмосферой и поверхностью земли, в результате чего поступающая солнечная коротковолновая радиация и тепловой поток в почву на южном склоне больше, чем на северном. Таким образом, ориентация склонов является одним из существенных экологических факторов, влияющих на поступление солнечной энергии, температуру и влажность грунтов северо-восточной части гор Дасинъаньлин, а также играет решающую роль в пространственном распределении и эволюции сезонной мерзлоты в регионе и, соответственно, влияет на устойчивость и безопасность инженерных сооружений. Выполненное исследование имеет важное значение для понимания взаимосвязи климата и мерзлоты в горных районах сезонной криолитозоны и оптимизации граничных условий при моделировании процессов промерзания – протаивания горных пород.

Ключевые слова: экспозиция склона, поверхностные гидротермальные процессы, режимные наблюдения и количественный анализ, сезонная мерзлота, Дасинъаньлин

Для цитирования: Юй Мяо, Павлова Н. А., Дай Чанлэй. Гидротермические условия почвы южного и северного склонов северо-восточного Дасинъаньлина, Китай // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 408–423. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-408-423>.

HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

Original article

Hydrothermal conditions of southern and northern slope soils of northeastern Great Xing'an Mountain, China

Miao Yu^а, Nadezhda A. Pavlova^б, Changlei Dai^с

^аAmmosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

^бMelnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

^сHeilongjiang University, Harbin, China

Corresponding author: Nadezhda A. Pavlova, pavlova@mpi.ysn.ru

Abstract. The purpose of the article is to study the influence features of polar-oriented slopes on the near-surface energy and hydrothermal balance in the seasonal cryolithozone. The authors carried out a complex of field observations including

© Юй Мяо, Павлова Н. А., Дай Чанлэй, 2022



measurement of air and underlying surface temperature, soil moisture, solar radiation and wind speed at the hydrological stations of Songling (southern slope) and Luoguhe (northern slope) in the northeast of the Great Xing'an Mountain (China). The analysis of the data obtained allowed to conclude that, on the one hand, the long-term influence of the thermal balance components causes significant differences in the soil structure and properties on differently oriented slopes. The number of daily freeze-thaw soil cycles on the southern slope (100 cycles) significantly exceeds the ones on the northern slope (56 cycles). The soil on the southern soil is 3 °C warmer than that on the northern slope, and its humidity in the area of the Songling hydrological station is lower than that at the Luoguhe station. On the other hand, differences in soil properties control the energy exchange between the atmosphere and the earth's surface, this means that the incoming short-wave solar radiation and heat flux into the soil on the southern slope is greater than on the northern one. Therefore, slope orientation is one of the significant environmental factors affecting the influx of solar energy, temperature and humidity of the soils in the northeastern Great Xing'an Mountain. It also has a decisive role for the spatial distribution and evolution of seasonal permafrost in the region and, accordingly, affects the stability and safety of engineering structures. The performed research is important for understanding the relationship between climate and frozen soil in the mountainous areas with seasonal cryolithozone as well as for optimization of boundary conditions when modeling rock freeze-thaw processes.

Keywords: slope exposure, surface hydrothermal processes, routine observations and quantitative analysis, seasonal frozen earth, the Great Xing'an Mountain

For citation: Yu Miao, Pavlova N. A., Dai Changlei. Hydrothermal conditions of southern and northern slope soils of northeastern Great Xing'an Mountain, China. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(4): 408-423. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-408-423>.

Введение

Дасинъаньлин (Большой Хинган) – горная система на северо-востоке Китая. Ее северная часть расположена на границе южной криолитозоны и области глубокого сезонного промерзания пород [1–3]. В данной переходной зоне высокотемпературные многолетнемерзлые и сезонномерзлые породы чрезвычайно чувствительны к изменениям окружающей среды [4–9], поэтому четкое представление о формировании и изменении теплового состояния грунтов под действием различных факторов на границе криолитозоны имеет важное значение для экологии, освоения территории и обслуживания инженерных объектов и сооружений. В региональном масштабе существование многолетней и сезонной мерзлоты контролируется климатом, географическим и высотным положением местности [10]. В локальном плане ландшафтные условия, включающие растительность, снежный покров, литологический состав грунтов, уклон поверхности и экспозицию склонов, играют важную роль в регулировании пространственного распределения гидротермических характеристик пород слоя сезонного протаивания и промерзания [10, 11]. В горных районах большое влияние на гидротермический режим почв и горных пород оказывает экспозиция склонов. Из-за разного количества поступающей на них лучистой энергии наблюдаются большие различия в пространственном распределении мерзлых пород [11, 12]. В связи с

этим в последние годы возрастает интерес к изучению влияния экспозиции склонов на формирование температурного поля пород и динамику сезонной и многолетней мерзлоты. Так, по данным М. Н. Железняк [13], в районе Алданского плоскогорья (юго-восток Сибирской платформы) в области прерывистого распространения многолетней мерзлоты на равных высотах на склонах южной экспозиции температура пород в целом на 1–3 °C выше, чем на склонах северной экспозиции. Дж. Лиу и др. [14] при геокриологических исследованиях внутренних районов Тибетского нагорья выявили, что термическая стабильность грунтов и содержание в них льда выше, а площадное распределение многолетней мерзлоты более сложное на северных склонах, чем на южных. Ж. Луо и др. [15] при изучении теплового режима пород гор Куньлунь в период 2014–2016 гг. установили, что средняя годовая температура поверхности земли на южном и северном склонах составляла -1,5 и -2,8 °C соответственно, а грунты в кровле вечной мерзлоты теплее на 0,6 °C на южном склоне, чем на северном. Ц. Ву и др. [16] и Ю. Чоу и др. [17] проанализировали результаты мониторинговых геотермических наблюдений на участках Цинхай-Тибетской железной дороги в пределах зоны развития высокотемпературных мерзлых грунтов и оценили влияние солярной ориентации откосов на устойчивость насыпи. Исследователи отметили, что разница температур грунта между



северным и южным откосами достигает 4 °С, и пришли к выводу, что причиной неравномерного оседания дорожного полотна является асимметричное оседание кровли многолетней мерзлоты. М. Ишикава и др. [18] на основании долгосрочных мониторинговых наблюдений за температурой и влажностью грунтов в зоне прерывистого распространения мерзлоты в северо-восточной Монголии установили преимущественное распространение многолетнемерзлых пород на затененных склонах, здесь же отмечено максимальное содержание влаги в почве.

Обзор предыдущих исследований показал, что на разноориентированных склонах водно-тепловой режим почвогрунтов, формирующийся под действием природных факторов, оказывает важное влияние на пространственное распределение сезонной мерзлоты в горных районах и имеет далеко идущие последствия для устойчивости инженерных сооружений. Вместе с этим из-за ограниченного набора определяемых параметров окружающей среды и технических средств, а также сложной логистики в труднодоступные горные районы большинство результатов исследований процессов протаивания – промерзания пород имеет описательный характер и базируется на экспериментальных данных с разреженным или коротким рядом наблюдений, ограниченным полевым сезоном. Непрерывные круглогодичные исследования динамики влаги, тепла и солнечной энергии, а также особенностей взаимосвязи этих параметров в сезонно- и многолетнемерзлых грунтах в условиях горного рельефа остаются в литературе малоосвещенными. Для более полного понимания принципов формирования водно-теплого режима почвогрунтов, научно-обоснованных прогнозов изменения глубин деятельного слоя в области криолитозоны и регулирования процессов сезонного протаивания и промерзания пород требуются дополнительные количественные оценки вышеназванных параметров.

В настоящей работе представлены результаты комплексного изучения особенностей пространственно-временной изменчивости составляющих тепло-влагообмена почвы и атмосферы на полярно ориентированных

склонах гор Дасинъаньлин.

Материалы и методы исследования

Хребет Дасинъаньлин протягивается с юго-востока на северо-запад. Длина его более 1400 км, ширина – от 200 до ~400 км, высота над уровнем моря достигает 1100–1443 м (рис. 1). Особенностью климата этого региона является его резкая континентальность, которая проявляется в низких температурах воздуха зимой с абсолютным минимумом -52,3 °С и высоких температурах летом, достигающих 26–33 °С, с резкими перепадами в течение суток. Средняя годовая температура воздуха составляет -2,8 °С. Годовое количество атмосферных осадков – около 746 мм, из них около 50 % выпадает в июле и августе. На зимний период (ноябрь – март) приходится примерно 8 % от годовой суммы осадков. За это время формируется снежный покров максимальной толщины от 6,2 до 35,3 см [19].

В качестве ключевых участков исследований нами были выбраны гидрометеорологические станции Сунлин и Логухэ с близкими геолого-геоморфологическими условиями (см. рис. 1). Ключевые участки Сунлин (далее – южный склон) и Логухэ (далее – северный склон) расположены на высотах 600 и 655 м с уклонами поверхности 6,8 и 7,1° соответственно. Растительный покров на южном склоне по сравнению с северным скудный, соответственно изменяется и содержание органического вещества в почве на глубине 0,05 м: 31,21 г/кг на станции Сунлин и 16,34 г/кг на станции Логухэ. Геологическое строение участков изучено до глубины 5 м. При бурении скважин были вскрыты однотипные литологические разрезы (рис. 2). Сверху залегают гравийно-щебнистые отложения с песчаным и суглинистым заполнителем. Их мощность составляет 1,5 м на северном склоне и 1,8 м на южном. Вниз по разрезу дисперсность пород возрастает, и с глубины 3–3,4 м залегают песчано-глинистые отложения. Слой сезонного промерзания пород формируется в октябре и полностью оттаивает на северном склоне в конце июня, а на южном – в конце мая. Его максимальная мощность составляет 2,9–3,5 м на станции Логухэ и 2,2–3 см на станции Сунлин.

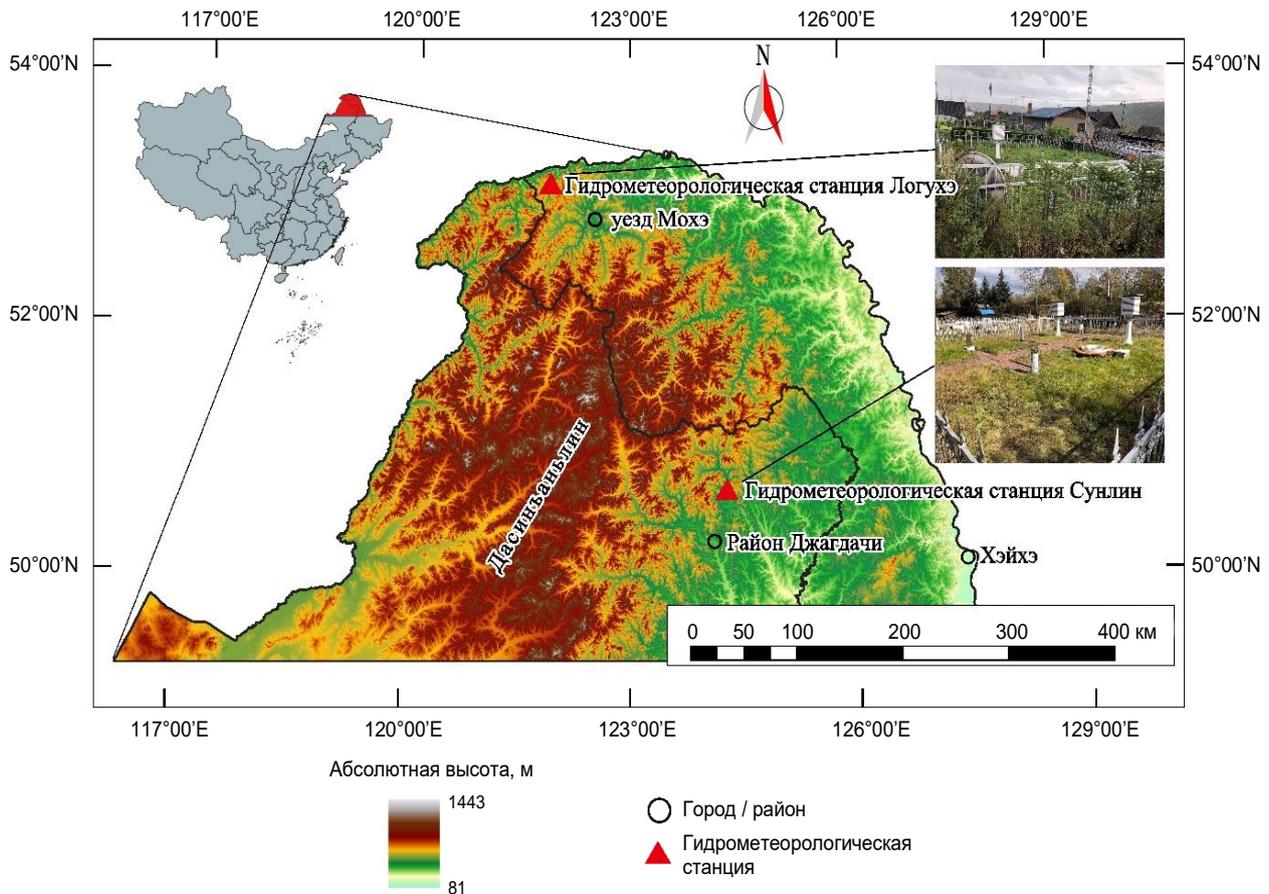


Рис. 1. Расположение гидрометеорологических станций Сунлин (южный склон) и Логухэ (северный склон) в регионе Дасинъаньлин
Fig. 1. Location of hydrometeorological stations of Songling (southern slope) and Luoguhe (northern slope) in Great Xing'an Mountains

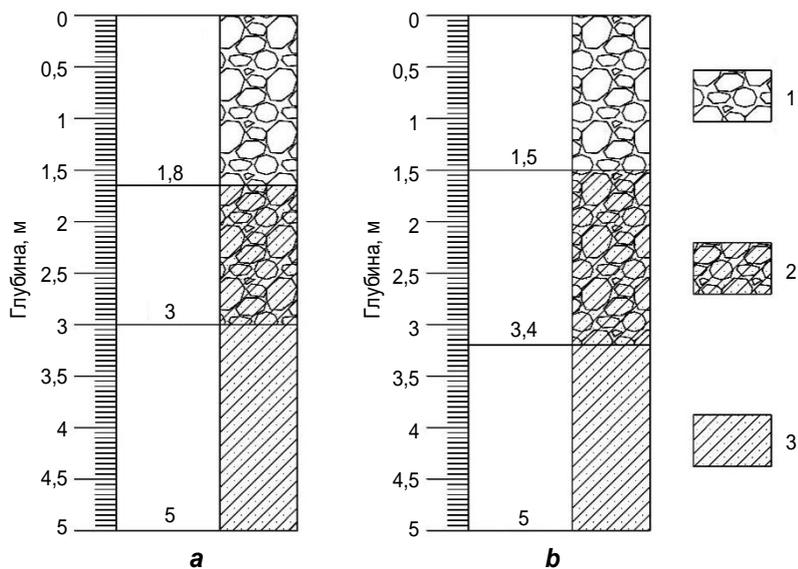


Рис. 2. Геологическое строение ключевых участков на южном (а) и северном (б) склонах гор Дасинъаньлин:
1 – гравийно-щебнистые почвы; 2 – песчаная глина с галькой; 3 – песчаная глина
Fig. 2. Geological structure of the key sites on the southern (a) and northern (b) slopes of the Great Xing'an Mountains:
1 – gravel-pebble soils; 2 – sandy clay with pebbles; 3 – sandy clay



На изучаемых участках метеорологические параметры (температура воздуха и скорость ветра) замерялись и записывались в автоматическом режиме специальными датчиками, установленными на высоте 1,8 м от поверхности земли. Общее солнечное излучение фиксировалось с помощью измерителя SMP11 со спектральным диапазоном длин волн 310–2800 нм и максимальной интенсивностью излучения 2000 Вт/м². Тепловые потоки в почве замерялись соответствующим датчиком, установленным на глубине 0,05 м от поверхности земли. Перечисленные выше параметры регистрировались каждые 30 минут. По полученным данным были рассчитаны средние суточные значения солнечной радиации, альбедо поверхности, температуры воздуха, скорости ветра и теплового потока в почве. При расчете средних месячных величин солнечной радиации и альбедо поверхности использовали средние суточные значения для каждого месяца с октября 2018 г. по май 2020 г., многолетние средние значения вычисляли на основе ежедневных средних значений с 11 октября 2018 г. по 31 мая 2020 г.

Для изучения изменения температуры и влажности почвогрунтов на каждом ключевом участке было пробурено по три скважины, в которых установлены логгеры с соответствующими датчиками автоматической регистрации данных. В представленном исследовании использованы данные о температуре почвы на глубине 0,05 м от поверхности земли (далее «слой почвы мощностью 0,05 м» и «подстилающая поверхность» используются как синонимы). Содержание влаги в грунтах измерялось на глубинах 0,05, 0,25, 0,75 и 1,5 м. Записи показаний температуры и влажности почвогрунтов велись с периодичностью в 3 часа. По ним были рассчитаны средние суточные значения. В расчетах средних температур грунтов учитывали данные, получаемые по трем скважинам. Кроме того, для количественной оценки различий температур грунтов на северном и южном склонах результаты измерений на каждом участке мониторинга были подвергнуты статистическому анализу, для обоих участков также были рассчитаны величины погрешности измерений. Наблюдения, начатые 11 октября 2018 г., продолжа-

лись до 31 мая 2020 г. и охватили два полных цикла промерзания – протаивания пород.

Высота снежного покрова измерялась вручную с помощью снегомерной ленты. При наличии снежного покрова высотой $\geq 0,5$ см он считался существующим на участке, а этот день регистрировался как один снежный день. По результатам мониторинга снежный покров устойчиво сохранялся с 21 октября 2018 г. по 19 апреля 2019 г. и с 23 октября 2019 г. по 17 апреля 2020 г. Максимальной толщины он достигал в январе: 28–30,1 см на северном склоне и 19,5–20,2 см на южном участке.

Результаты исследования

Температура воздуха и скорость ветра. По данным наблюдений 1980–2020 гг., средняя годовая температура воздуха в районе станции Сунлин равна $-0,5$ °С, а на станции Логухэ $-1,7$ °С. В 2018–2020 гг. на исследуемых участках в бесснежный период года среднесуточные максимальные температуры воздуха на южном и северном склонах составили 23,9 и 22,5 °С соответственно. В период устойчивого снежного покрова среднесуточные минимальные температуры воздуха на южном и северном склонах достигали $-28,4$ и $-33,1$ °С соответственно. На обоих участках диапазон изменения среднесуточных температур воздуха был шире при наличии снежного покрова, чем без него.

Скорость ветра оказывает влияние на гидротермическое состояние поверхности земли в теплое время года вследствие перемешивания верхних теплых и нижних холодных слоев воздуха. Ветровой режим на ключевых участках примерно одинаков (рис. 3). Наиболее ветреные месяцы – апрель и май. В бесснежный период средняя суточная скорость ветра незначительно отличается и составляет 2,3 м/с на южном склоне и 2 м/с на северном.

Температурный режим и динамика промерзания – протаивания почвы. Сезонные, суточные и внутрисуточные колебания температуры в верхней части слоя сезонного протаивания оказывают важное влияние на текстуру и свойства почвы. По данным наблюдений 2018–2020 гг., диапазон внутрисуточных колебаний температуры почвы на глубине 0,05 м на южном склоне значительно шире,

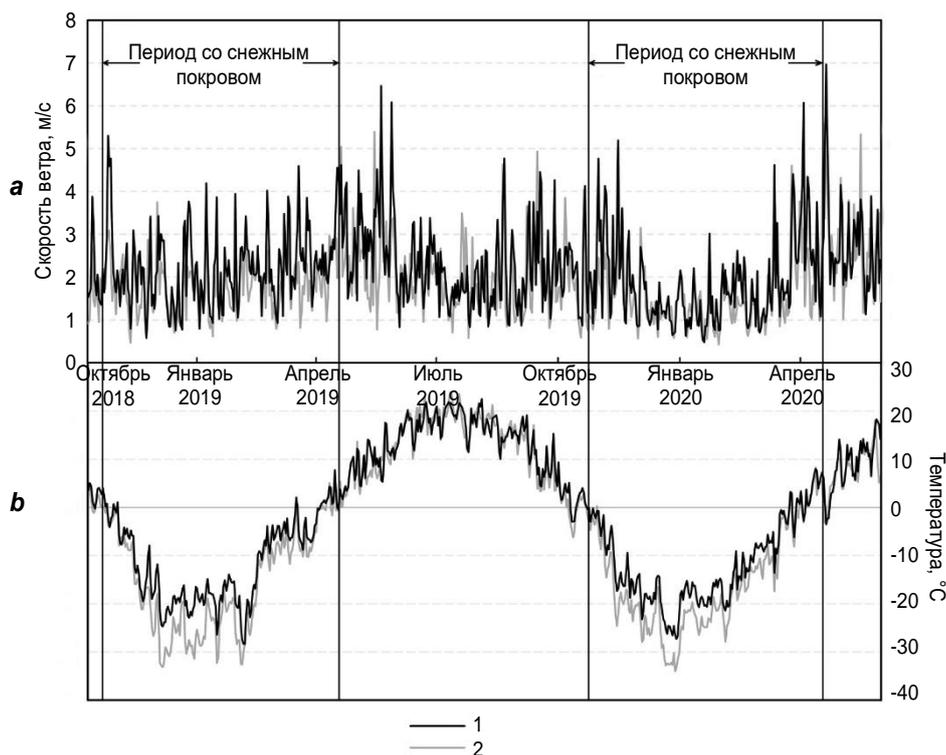


Рис. 3. Средние суточные скорость ветра (а) и температура воздуха (б) на ключевых участках:

1 – южный склон; 2 – северный склон

Fig. 3. Average daily wind speed (a) and air temperature (b) at key sites:

1 – southern slope; 2 – northern slope

чем на северном, и составляет 6,3 и 3,9 °С соответственно. Разница в экстремумах средней суточной температуры подстилающей поверхности на изучаемых участках составляет в теплый период года 1,5–8,8 °С, а в холодный 2,6–4 °С. При сходных метеорологических параметрах летом почва на южном склоне прогревается лучше, чем на северном (рис. 4). Это явление объясняется следующим: во-первых, южный склон, имея относительно большее количество световых часов, нагревается за счет солнечной радиации интенсивнее северного; во-вторых, на северном склоне относительно высокая удельная теплоемкость более влажной почвы сдерживает прогревание грунта и сокращает амплитуду изменения температуры.

Зимой при малом поступлении лучистой энергии, а также благодаря теплоизоляционным свойствам снежного слоя полярно ориентированные склоны охлаждаются практически одинаково.

Для изучения динамики промерзания – протаивания почвы в качестве пограничной величины использована температура 0 °С.

Суточный цикл промерзания – оттаивания считается состоявшимся, если в течение суток фиксируются переходы отрицательной температуры к положительной и наоборот. За период наблюдений на южном участке зафиксировано 100 ежедневных циклов промерзания – оттаивания почвы, в то время как на северном за это же время только 56. Причина разницы в числе циклов кроется в пониженной влажности почвы и скудном растительном покрове на южном склоне по сравнению с северным. Чем суше почва, тем меньше тратится тепла на фазовые переходы, следовательно, тем быстрее грунт нагревается днем и охлаждается ночью.

Момент перехода средних суточных положительных значений температуры к отрицательным принят как начальная дата сезонного промерзания почвы. Время, когда среднесуточная температура грунтов становится выше 0 °С, считается начальной датой их оттаивания. Согласно полученным результатам, в период наблюдений формирование сезонно-мерзлого слоя на южном склоне запаздывает относительно северного на 15–20 суток, а раз-



рушение начинается раньше на период от 2 дней до 10 суток (табл. 1). Из-за разной продолжительности периода, когда грунты нахо-

дятся в мерзлом состоянии, их среднегодовая температура на южном склоне на 3,1 °С выше, чем на северном.

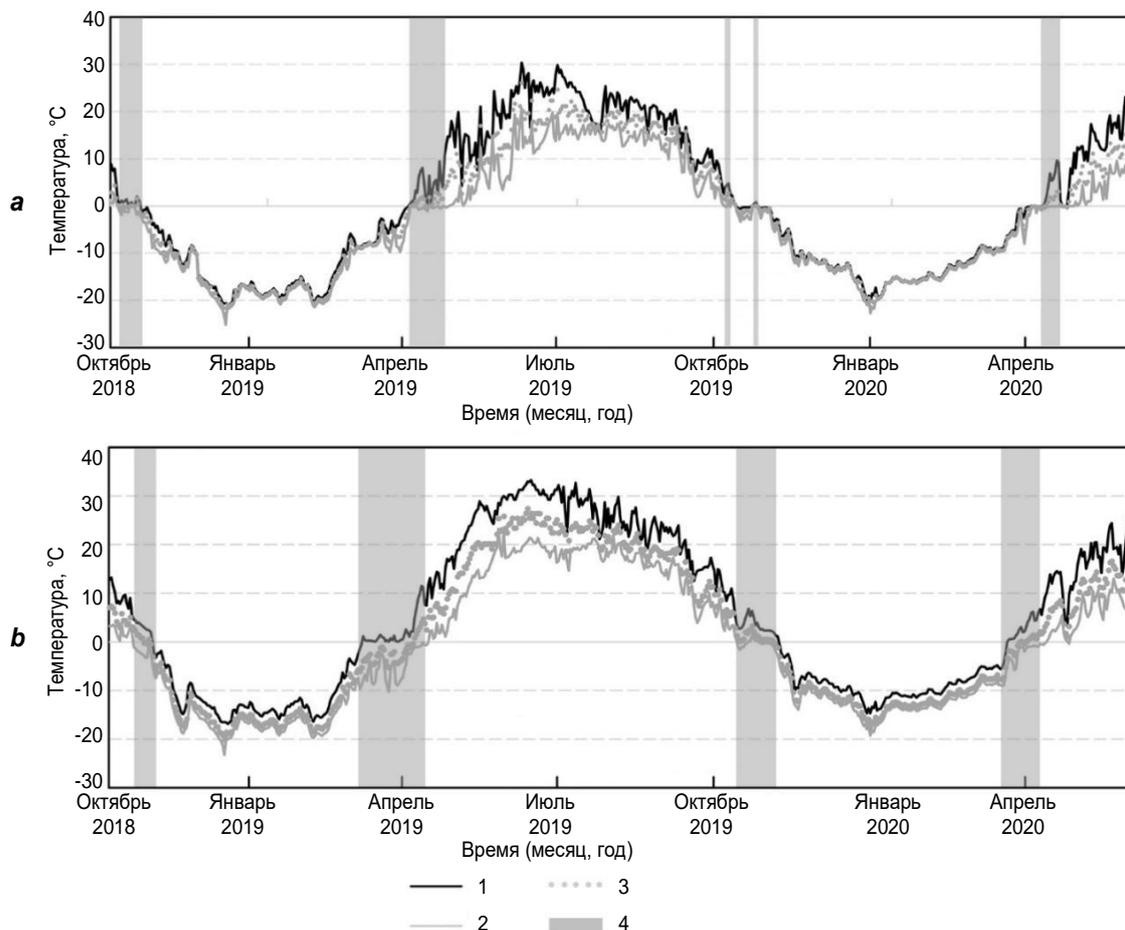


Рис. 4. Пределы изменения и средние температуры почвы на глубине 0,05 м на северном (а) и южном (б) склонах гор Дасиньянлин:

1 – максимальная температура; 2 – минимальная температура; 3 – средняя температура;
4 – суточный цикл промерзания – оттаивания

Fig. 4. Variation limits and average soil temperatures at 0.05 m depth on the northern (a) and southern (b) slopes of the Great Xing'an Mountains:

1 – maximum temperature; 2 – minimum temperature; 3 – average temperature; 4 – daily freeze-thaw cycle

Таблица 1. Изменение температуры грунта на глубине 0,05 м на исследуемых участках
Table 1. Soil temperature variation at 0.05 m depth on the sites under investigation

Параметр	11 октября 2018 г. – 31 мая 2019 г.		1 июня 2019 г. – 31 мая 2020 г.	
	Южный склон	Северный склон	Южный склон	Северный склон
Дата начала промерзания	31 октября	16 октября	3 ноября	12 октября
Дата начала протаивания	7 апреля	5 апреля	29 марта	9 апреля
Длительность периода промерзания, сут.	159	172	148	168
Средняя годовая температура, °С	–	–	4,5	1,4
Максимальная среднесуточная температура грунта, °С (дата)	25,8 (29 мая)	17 (15 мая)	27,5 (12 июня)	26 (8 июня)
Минимальная среднесуточная температура грунта, °С (дата)	-20,2 (17 декабря)	-22,8 (17 декабря)	-17,4 (29 декабря)	-21,4 (29 декабря)

Примечание. Прочерк – данные отсутствуют.



Изменение влажности почвы. Содержание влаги в мерзлой почве на разных глубинах в период устойчивых отрицательных температур воздуха варьируется незначительно. При наступлении положительных температур воздуха влажность почвы на глубине 0,05 м заметно изменяется из-за инфильтрации талой воды и летних атмосферных осадков, а также процессов испарения. На глубинах 0,25 и 0,75 м динамика содержания влаги в почве в течение года близка на обоих участках, отмечается лишь небольшое отставание ее изменения на глубине 0,75 м по сравнению с вышележающим слоем (рис. 5). В основании разреза на глубине 1,5 м влажность почвы колеблется незначительно.

В период наблюдений максимальное влагонасыщение почвы по всему разрезу отмечалось в середине мая, середине июля и начале

сентября, а осушение происходило в июне – начале июля. В целом на всех глубинах влажность почвы выше на северном склоне, чем на южном (табл. 2). С началом осенних заморозков (с октября) и до конца марта при промерзании грунтов кривая содержания в них незамерзшей воды постепенно выполаживается. В течение зимы слабовыраженный рост влажности на глубине 0,05 м на фоне ее небольшого понижения в остальной части изучаемого разреза свидетельствует о миграционных процессах в изучаемой толще (перенос влаги из нижележащих талых пород в наиболее охлажденные приповерхностные слои).

Распределение солнечной радиации. Поток лучистой энергии подвержен отчетливым сезонным изменениям (рис. 6, табл. 3). По имеющимся данным, коротковолновая солнечная радиация на южном и северном склонах

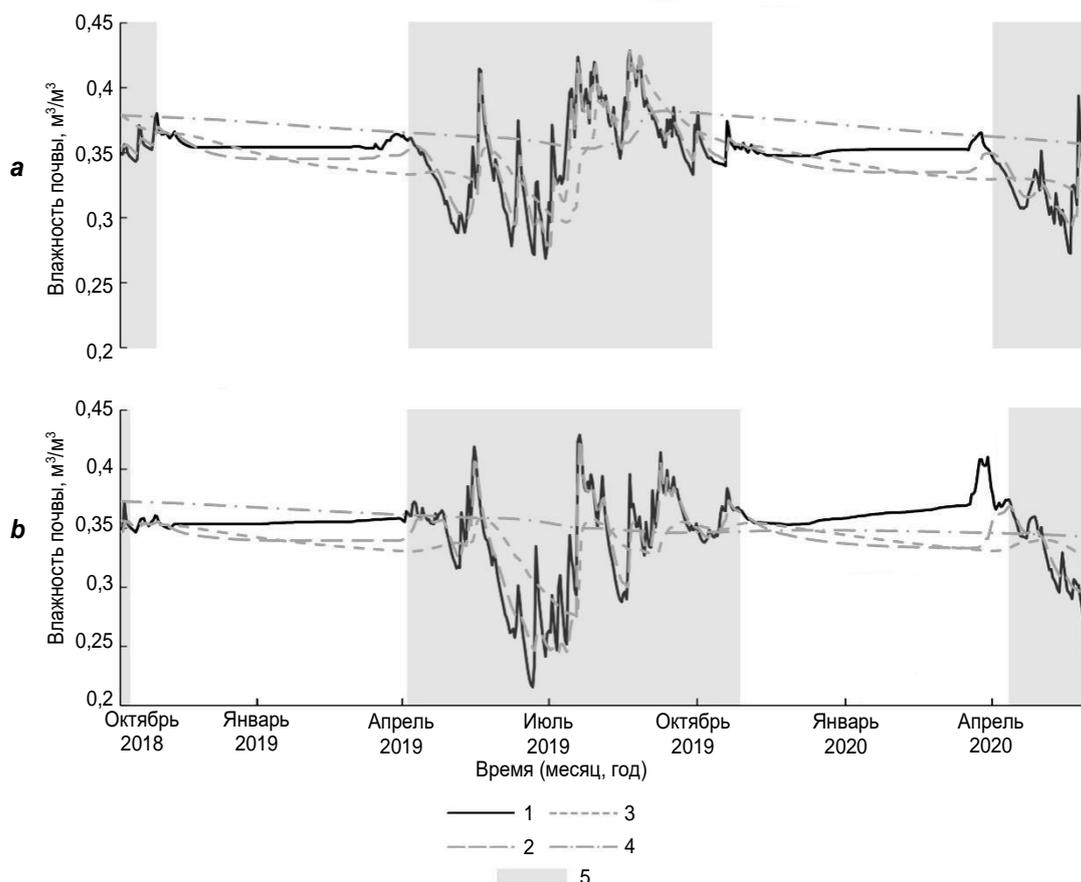


Рис. 5. Изменение средней суточной влажности почвы на разной глубине на южном (а) и северном (б) склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин: 1 – 0,05 м; 2 – 0,25 м; 3 – 0,75 м; 4 – 1,5 м; 5 – период с положительными температурами воздуха
Fig. 5. Variation of average daily soil moisture at different depths on the southern (a) and northern (b) slopes of the north-east of the Great Xing'an Mountains: 1 – 0.05 m; 2 – 0.25 m; 3 – 0.75 m; 4 – 1.5 m; 5 – period with positive air temperatures



Таблица 2. Средняя суточная влажность почвогрунтов на разной глубине на южном и северном склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин, m^3/m^3
Table 2. Average daily moisture content of soils at different depths on the southern and northern slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains, m^3/m^3

Глубина, м	Максимальная		Минимальная		Средняя	
	Южный склон	Северный склон	Южный склон	Северный склон	Южный склон	Северный склон
0,05	0,43	0,48	0,24	0,27	0,35	0,4
0,25	0,43	0,48	0,28	0,29	0,34	0,39
0,75	0,43	0,44	0,3	0,33	0,35	0,39
1	0,38	0,42	0,35	0,39	0,37	0,4

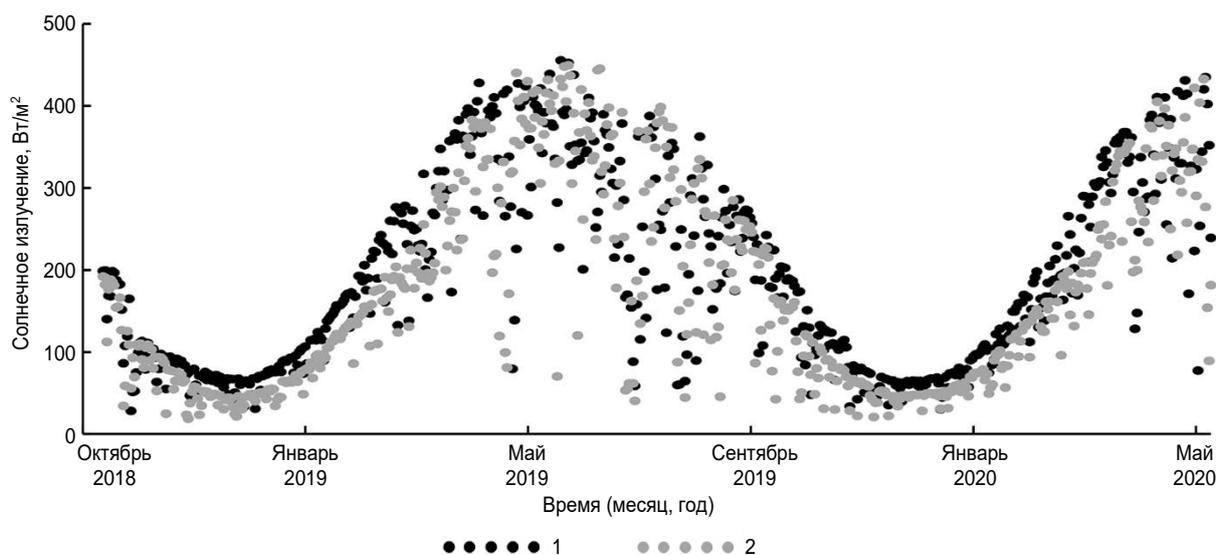


Рис. 6. Динамика солнечной радиации на северном и южном склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин:

1 – северный склон; 2 – южный склон

Fig. 6. Solar radiation dynamics on the northern and southern slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains:

1 – northern slope; 2 – southern slope

Таблица 3. Средние месячные значения коротковолновой радиации, W/m^2 , на южном и северном склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин, 2018–2020 гг.
Table 3. Average monthly values of shortwave radiation, W/m^2 , on the southern and northern slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains, 2018–2020

Месяц	Ориентация склона	
	Южный	Северный
Январь	82	59
Февраль	146	114
Март	224	173
Апрель	304	268
Май	340	317
Июнь	367	364
Июль	263	263
Август	242	272
Сентябрь	235	211
Октябрь	162	127
Ноябрь	91	65
Декабрь	59	44
Среднее значение	210	190



достигала максимума 15 и 19 июня 2019 г. (424 и 447 Вт/м² соответственно), а минимальная была 18 ноября и 1 декабря 2019 г. (34 и 21 Вт/м² соответственно). С октября по январь радиационный поток снижался с 200 до 100 Вт/м². С февраля по мере продвижения солнца на север и схода снежного покрова приток солнечной радиации на обоих участках постепенно увеличивался и достиг пиковых значений в середине мая – июне. В летние месяцы с началом вегетационного сезона в процессе наращивания растительного покрова, а также при увеличении облачности проникновение солнечной радиации к поверхности земли периодически затруднялось, что отразилось в скачкообразных изменениях ее величин. В конце октября смещение солнца на юг и появление снежного покрова привели к дальнейшему понижению потока лучистой энергии, поступающего на поверхность земли.

В целом на южном склоне в течение всего года, за исключением июля, условия для инсоляции были лучше, чем на северном, из-за большего угла падения солнечных лучей. В июле разница в приходе радиации между ключевыми участками составила менее 1 %. В это время при максимальной высоте стояния солнца его энергетические ресурсы распределялись равномерно по поверхности земли. В декабре – феврале из-за уменьшения угла наклона солнечных лучей северный склон слабее подвержен инсоляции, поэтому количество получаемой им энергии излучения меньше, чем у южного склона. Максимальный же контраст средней месячной величины коротковолновой радиации на изучаемых участках отмечен в переходные периоды года – время становления и разрушения снежного покрова. Разница средней годовой плотности потока солнечной радиации, поступающей на полярно ориентированные склоны, составила 20 Вт/м².

Обсуждение полученных результатов

Влияние экспозиции склонов на свойства приповерхностной зоны грунтов. В процессе статистической обработки результатов годового цикла (с 1 июня 2019 г. по 30 мая 2020 г.) наблюдений, полученных по трем скважинам

на каждом участке, установлено, что температурные условия подстилающей поверхности на полярно ориентированных склонах не одинаковы. На южном склоне во всех точках наблюдений разброс значений температуры грунта на глубине 0,05 м относительно невелик, а стандартная ошибка средней годовой температуры в целом меньше, чем на северном склоне (рис. 7). Максимальная и минимальная средние суточные температуры, а также средняя годовая температура грунта в каждой точке наблюдений на южном склоне близки и имеют стандартные ошибки 0,54, 0,56 и 0,32 соответственно, для северного склона этот статистический параметр оказался выше и составил 0,69, 0,7 и 0,38 соответственно.

Контраст температурных условий почвы ассоциирован с особенностями растительности. Так, на южном склоне разреженный, но однообразный по площади растительный покров приводит к незначительной вариации свойств подстилающей поверхности (влажности, шероховатости и т. д.) и, следовательно, к относительно равномерному распределению температур грунта в верхней части разреза. На северном склоне пространственная неоднородность растительного покрова определяет более пеструю картину теплового поля в приповерхностных слоях почвы.

Влияние эффектов южного и северного склонов на энергетический баланс у поверхности земли. Известно, что экспозиция склонов в горных районах играет существенную роль в нагревании поверхности за счет поступающей солнечной радиации [20]. На изучаемых участках между поступающей лучистой энергией и температурой почвы на глубине 0,05 м существует заметная положительная корреляция (рис. 8). При этом выявленная разница радиации, приходящей на разноориентированные склоны, несущественна, в связи с чем лучистая энергия не может рассматриваться в качестве единственного фактора, влияющего на термический режим грунтов.

Зимой при наличии снежного покрова коротковолновая солнечная радиация обычно не превышает 200 Вт/м². Основная ее часть отражается от снега обратно в атмосферу

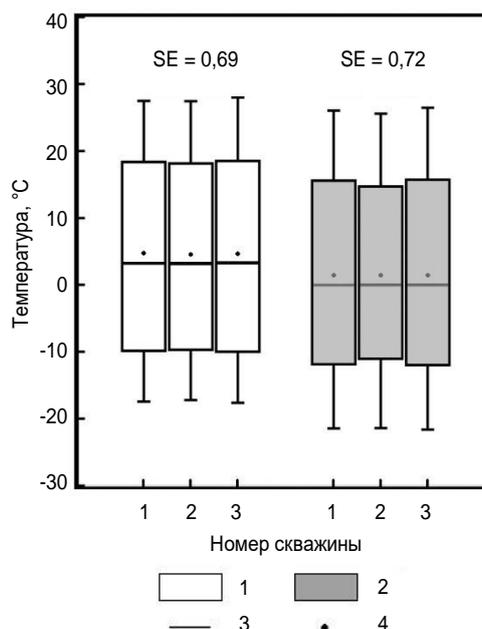


Рис. 7. Распределение средней годовой температуры грунта на глубине 0,05 м на изучаемых участках в период 2019–2020 гг.:

1 – южный склон; 2 – северный склон; 3 – медиана; 4 – среднегодовые геотермы

Fig. 7. Distribution of the average annual soil temperature at 0.05 m depth on the sites under investigation for the period from 2019 to 2020:

1 – southern slope; 2 – northern slope; 3 – median; 4 – average annual geotherms

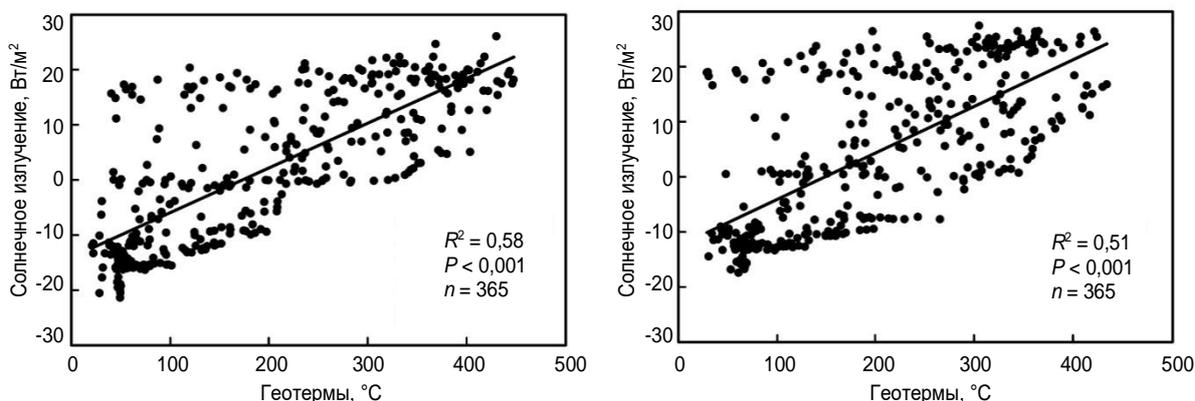


Рис. 8. Зависимость температура почвы (глубина 0,05 м) от солнечной коротковолновой радиации на северном (а) и южном (б) склонах северо-восточной части гор Дасиньаньлин в период 2019–2020 гг.

Fig. 8. Dependence of soil temperature (0.05 m depth) on shortwave solar radiation on the northern (a) and southern (b) slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains for the period from 2019 to 2020

в виде длинноволновой радиации. Остальная – меньшая – часть через снежную толщу проникает неглубоко от поверхности земли. В результате в зимний период средние суточные значения температуры почвы на глубине 0,05 м оказались ненамного выше средних суточных температур воздуха. Разница между ними составила на южном склоне 1,8 °С, а на северном 4,3 °С.

Различия в свойствах подстилающего слоя оказывает важное влияние на распределение теплового потока в почве. Поверхност-

ный поток возникает благодаря лучистой энергии солнца, зависит от ее интенсивности и продолжительности суточного поступления, а также от особенностей турбулентного влагообмена между ландшафтной оболочкой земли и атмосферой [8]. По имеющимся данным, на изучаемых участках весной и в первой половине лета плотность теплового потока на глубине 0,05 м имела отрицательные значения, то есть поток тепла был направлен из почвы в атмосферу (рис. 9). При этом на южном склоне из-за низкой влажности почвы

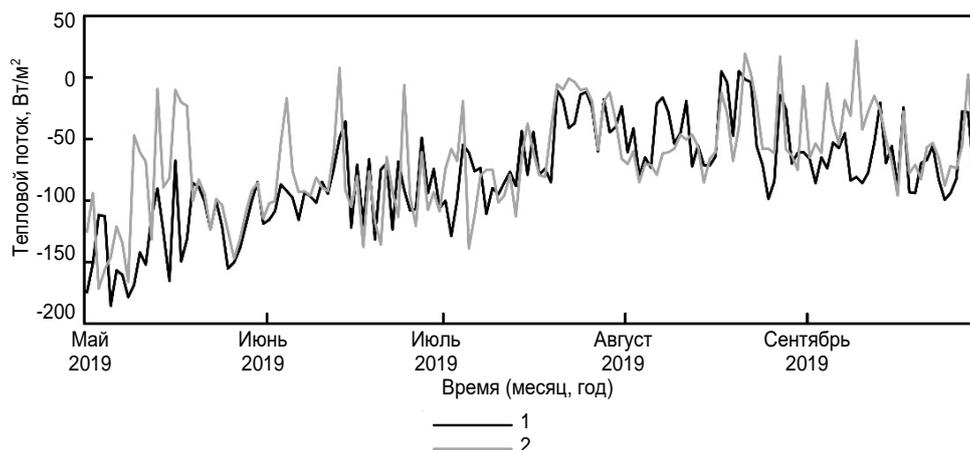


Рис. 9. Динамика тепловых потоков почвы на северном и южном склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин в 2019 г.:

1 – северный склон; 2 – южный склон

Fig. 9. Soil heat flux dynamics on the northern and southern slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains:

1 – northern slope; 2 – southern slope

расход тепла превосходил его потерю на северном участке. В конце июля – августе величина теплового потока приблизилась к нулевым значениям, а скачкообразные изменения солнечной радиации нивелировали разницу среднесуточного потока на склонах разной экспозиции. В сентябре устойчивое сезонное понижение лучистой энергии отразилось в постепенной потере тепла почвой.

Согласно данным мониторинга, колебание тепловых потоков на глубине 0,05 м в течение суток, вызываемые нагреванием почвы днем и охлаждением ночью, на южном склоне больше, чем на северном. Различие в контрасте дневных теплооборотов объясняется следующими факторами: пониженная влажность и грубый механический состав почвы на южном склоне интенсифицирует теплообменные процессы; чем выше скорость ветра, тем сильнее эффект турбулентного теплообмена между поверхностью и атмосферой, поэтому суточные изменения плотности теплового потока более выражены на южном склоне, чем на северном.

Влияние экспозиции склонов на изменение температуры и влажности почвы в приповерхностной зоне. Поступление солнечной радиации в теплый период года на поверхность склона южной ориентации ненамного больше, чем на склон, обращенный к северу. При этом почва на южном склоне летом, особенно в первые его месяцы, нагревается

заметно сильнее, чем на северном. Причины этого различия могут быть связаны с особенностями растительного покрова и составом почвы. Во-первых, растительность является одним из факторов, определяющих теплообмен между атмосферой и литосферой [11]. Измеренное солнечное излучение в данном исследовании – это энергия над почвенным покровом. Более развитая кустарниковая растительность на северном склоне поглощает часть этого излучения. Следовательно, фактически солнечная радиация, достигающая поверхности почвы на северном склоне, будет меньше измеренного значения. Во-вторых, почва на южном склоне обеднена органическим веществом по сравнению с северным вследствие слабого роста растительности, что вместе с более высокой скоростью ветра усиливает процесс эрозии почвы. Кроме того, на северном склоне значительное количество органического вещества в почве понижает ее теплопроводность. В результате на южном склоне, где содержание крупных частиц и теплопроводность почвы выше, прогревание склона и теплообмен с атмосферой происходят интенсивнее.

Выравнивание температуры почвы на участках исследований в середине лета, возможно, обусловлено активизацией на северном склоне биохимических процессов (образованием и разложением органических веществ), которые сопровождаются выделением



тепла. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Совокупное влияние всех вышеперечисленных факторов (более высокие температура воздуха и скорость ветра, относительно редкая и низкорослая растительность, повышенное содержание крупных частиц) определяет низкую водоудерживающую способность почвы южного склона и более выраженные изменения содержания в ней влаги в течение года и с увеличением глубины по сравнению с северным склоном.

Заключение

Анализ результатов режимных наблюдений за температурой воздуха, скоростью ветра, величиной солнечной радиации, формированием и таянием снежного покрова, температурой и влажностью верхнего слоя почвы, тепловым потоком позволил уточнить влияние экспозиции склонов на динамику гидротермических параметров подстилающей поверхности в северо-восточной части гор Дасинъаньлин.

При изучении факторов, определяющих ход влаго- и теплообмена между атмосферой и почвой на северном и южном склонах горной системы Дасинъаньлин, выявлена пространственная изменчивость в поступлении лучистой энергии, растительности, температуре и влажности почвы, длительности и количестве циклов ее промерзания – оттаивания. Комплекс перечисленных факторов оказывает влияние на текстуру почвы. Состав и свойства почвы, в свою очередь, влияют на ее термическое состояние и влажность, а также рост растительности. Такая взаимосвязь элементов природной среды приводит к постепенному увеличению контраста в текстуре почвы между северными и южными склонами.

Интеграционное влияние солнечной радиации и свойств почвы приводит к превышению почти в два раза количества суточных циклов промерзания – оттаивания грунтов на глубине

0,05 м на южном склоне относительно северного склона.

Разность температуры и текстуры почвенного покрова между северным и южным склонами существенно сказывается на распределении влаги в сезоннопромерзающем слое пород. На южном склоне влажность грунтов в исследуемом интервале глубин (0,05–1,5 м) на 4–5 % меньше, чем на северном, из-за относительно высокой температуры почвы, большей скорости ветра, относительно неровной поверхности почвы и высокого испарения почвенной влаги.

Одновременно с тем, что неравенство в поступлении солнечной радиации на разные склоны отражается в специфике тепло- и влагообменных процессов в почве, температура и влажность почвы, скорость ветра, растительность также контролируют обмен энергией между атмосферой и поверхностью земли. Итогом этой взаимообусловленности является превышение величины среднегодовой солнечной коротковолновой радиации и выраженная суточная изменчивость тепловых потоков на южных склонах по сравнению с северными.

Таким образом, ориентация склонов является одним из существенных экологических факторов, влияющих на поступление солнечной энергии, температуру и влажность грунтов северо-восточной части гор Дасинъаньлин, а также играет решающую роль в пространственном распределении и эволюции сезонной мерзлоты в регионе и, соответственно, влияет на устойчивость и безопасность инженерных сооружений. Экспериментально полученные количественные характеристики составляющих тепло- и влагообмена могут быть использованы при задании параметров и верхних граничных условий в соответствующих моделях формирования и динамики слоя промерзания – протаивания горных пород для повышения точности мерзлотных и инженерно-геологических прогнозов.

Список источников

1. Ran Y., Li X., Cheng G., Zhang T., Wu Q., Jin H., et al. Distribution of permafrost in China: an overview of existing permafrost maps // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012. Vol. 23. Iss. 4. P. 322–333. <https://doi.org/>

10.1002/ppp.1756.

2. Mao Y., Li G., Ma W., Mu Y., Wang F., Miao J., et al. Field observation of permafrost degradation under Mo'he airport, Northeastern China from 2007 to 2016 // *Cold*



Regions Science and Technology. 2019. Vol. 161. P. 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.004>.

3. Li X., Jin H., Sun L., Wang H., He R., Huang Y., et al. Climate warming over 1961–2019 and impacts on permafrost zonation in Northeast China // *Journal of Forestry Research*. 2022. Vol. 33. Iss. 3. P. 767–788. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01403-y>.

4. Конищев В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // *Вестник Московского университета. Серия. 5. География*. 2009. № 4. С. 10–20.

5. Оберман Н. Г., Лыгин А. М. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород на примере европейского северо-востока страны // *Разведка и охрана недр*. 2009. № 7. С. 15–20.

6. Romanovsky V. E., Drozdov D. S., Oberman N. G., Malkova G. V., Kholodov A. L., Marchenko S. S., et al. Thermal state of permafrost in Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010. Vol. 33. Iss. 3. P. 136–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.683>.

7. Малкова Г. В., Павлов А. В., Скачков Ю. Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // *Криосфера земли*. 2011. Т. 15. № 4. С. 33–36.

8. Ge S., McKenzie J., Voss C., Wu Q. Exchange of groundwater and surface-water mediated by permafrost response to seasonal and longterm air temperature variation // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. Iss. 14. P. L14402. <https://doi.org/10.1029/2011gl047911>.

9. Нямдорж С. Мягмаржав М. Батсайхан А. Тамир Ц. Некоторые результаты исследований трещин и полостей, образованных вследствие деградации и исчезновения криолитозоны территории г. Налайха в Монголии // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 3. С. 52–62. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-3-52-62>.

10. Woo M. *Permafrost hydrology*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012. 564 p.

11. Павлов А. В. *Теплофизика ландшафтов*. Новосибирск: Наука, 1979. 285 с.

12. Шепелёв В. В. *Надмерзлотные воды криолитозоны*. Новосибирск: Гео, 2011. 169 с.

13. Железняк М. Н. *Геотемпературное поле и крио-*

литозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2005. 227 с.

14. Liu G., Zou D., Yang B., Du E., Zhou H., Xiao Y., et al. Preliminary results of permafrost investigation on northern and southern slopes of Mt. Geladandong, interior Qinghai-Tibet Plateau // *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022. Vol. 44. Iss. 1. P. 83–95. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0021>.

15. Luo J., Lin Z., Yin G., Niu F., Liu M., Gao Z., et al. The ground thermal regime and permafrost warming at tow upland, sloping, and undisturbed sites, Kunlun Mountain, Qinghai-Tibet Plateau // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 167. P. 102862. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102862>.

16. Wu Q., Liu Y., Hu Z. The thermal effect differential so-lar exposure on embankments along the Qinghai-Tibet Railway // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 66. Iss. 1. P. 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.001>.

17. Chou Y., Sheng Y., Li Y., Wei Z., Zhu Y., Li J. Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. Vol. 63. Iss. 1-2. P. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.001>.

18. Ishikawa M., Sharkhuu N., Zhang Y., Kadota T., Ohata T. Ground thermal and moisture conditions at the southern boundary of discontinuous permafrost, Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2005. Vol. 16. Iss. 2. P. 209–216. <https://doi.org/10.1002/ppp.483>.

19. Baoleerqimuge, Shu C., Ma X., Liu Z., Li C., Zhang Z. Analysis on the spatial-temporal characteristics of accumulated snow in the northern forestry region of greater khingan range from 1975 to 2016 // *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*. 2021. Vol. 42. Iss. 2. P. 27–35. <https://doi.org/10.16853/j.cnki.1009-3575.2021.02.006>.

20. Lu A., Pang D., Ge Y., He Y., Pang H., Yuan L. Effect of landform on seasonal temperature structures across China in the past 52 years // *Journal of Mountain Science*. 2006. Vol. 3. Iss. 2. P. 158–167. <https://doi.org/10.1007/s11629-006-0158-x>.

References

1. Ran Y., Li X., Cheng G., Zhang T., Wu Q., Jin H., et al. Distribution of permafrost in China: an overview of existing permafrost maps. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012;23(4):322-333. <https://doi.org/10.1002/ppp.1756>.

2. Mao Y., Li G., Ma W., Mu Y., Wang F., Miao J., et al. Field observation of permafrost degradation under Mo'he airport, Northeastern China from 2007 to 2016. *Cold Regions Science and Technology*. 2019;161:43-50. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.004>.

3. Li X., Jin H., Sun L., Wang H., He R., Huang Y., et al. Climate warming over 1961–2019 and impacts on permafrost zonation in Northeast China. *Journal of Forestry Research*. 2022;33(3):767-788. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01403-y>.

4. Konishchev V. N. Response of permafrost to the climate warming. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5,*

Geografiya = Moscow University Bulletin. Series 5, Geography. 2009;4:10-20. (In Russ.).

5. Oberman N. G., Lygin A. M. Prognosis of the degradation of permafrost in an example of european north-east of Russia. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2009;7:15-20. (In Russ.).

6. Romanovsky V. E., Drozdov D. S., Oberman N. G., Malkova G. V., Kholodov A. L., Marchenko S. S., et al. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010;33(3):136-155. <https://doi.org/10.1002/ppp.683>.

7. Malkova G. V., Pavlov A. V., Skachkov Yu. B. Estimation of frozen strata stability under modern climate change. *Kriosfera zemli*. 2011;15(4):33-36. (In Russ.).

8. Ge S., McKenzie J., Voss C., Wu Q. Exchange of groundwater and surface-water mediated by permafrost



response to seasonal and longterm air temperature variation. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(14):L14402. <https://doi.org/10.1029/2011gl047911>.

9. Nyamdorj S., Myagmarjav M., Batsaikhan A., Tamir Ts. Some results of studying cracks and cavities formed due to the degradation and disappearance of permafrost zone of the Nalayh town in Mongolia. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*. 2019;3:52-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-3-52-62>.

10. Woo M. *Permafrost hydrology*. Berlin: Springer Science & Business Media; 2012. 564 p.

11. Pavlov A. V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 285 p. (In Russ.).

12. Shepelev V. V. *Suprapermafrost waters in the cryolithozone*. Novosibirsk: Geo; 2011. 169 p. (In Russ.).

13. Zheleznyak M. N. *Geotemperature field and permafrost zone in the southeast of the Siberian platform*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 227 p. (In Russ.).

14. Liu G., Zou D., Yang B., Du E., Zhou H., Xiao Y., et al. Preliminary results of permafrost investigation on northern and southern slopes of Mt. Geladandong, interior Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022;44(1):83-95. (In Chinese). <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0021>.

15. Luo J., Lin Z., Yin G., Niu F., Liu M., Gao Z., et al. The ground thermal regime and permafrost warming at tow upland, sloping, and undisturbed sites, Kunlun Mountain, Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technol-*

gy. 2019;167:102862. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102862>.

16. Wu Q., Liu Y., Hu Z. The thermal effect differential so-lar exposure on embankments along the Qinghai-Tibet Railway. *Cold Regions Science and Technology*. 2011; 66(1):30-38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.001>.

17. Chou Y., Sheng Y., Li Y., Wei Z., Zhu Y., Li J. Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2010;63(1-2):78-86. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.001>.

18. Ishikawa M., Sharkhuu N., Zhang Y., Kadota T., Ohata T. Ground thermal and moisture conditions at the southern boundary of discontinuous permafrost, Mongolia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2005;16(2):209-216. <https://doi.org/10.1002/ppp.483>.

19. Baoleerqimuge, Shu C., Ma X., Liu Z., Li C., Zhang Z. Analysis on the spatial-temporal characteristics of accumulated snow in the northern forestry region of greater khingan range from 1975 to 2016. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*. 2021;42(2):27-35. (In Chinese). <https://doi.org/10.16853/j.cnki.1009-3575.2021.02.006>.

20. Lu A., Pang D., Ge Y., He Y., Pang H., Yuan L. Effect of landform on seasonal temperature structures across China in the past 52 years. *Journal of Mountain Science*. 2006;3(2):158-167. <https://doi.org/10.1007/s11629-006-0158-x>.

Информация об авторах / Information about the authors



Юй Мяо,
аспирант,
Горный институт,
Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
г. Якутск, Россия,
hss_yumiao@126.com.

Miao Yu,
Postgraduate Student,
Mining Institute,
Ammosov North-Eastern Federal University,
Yakutsk, Russia,
hss_yumiao@126.com.



Павлова Надежда Анатольевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории подземных вод
и геохимии крилитонозы,
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,
г. Якутск, Россия,
pavlova@mpi.ysn.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>.

Nadezhda A. Pavlova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher of the Laboratory of Permafrost Groundwater and Geochemistry,
Melnikov Permafrost institute SB RAS,
Yakutsk, Russia,
pavlova@mpi.ysn.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>.



Дай Чанлэй,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
директор,
Академия гидравлики и электроэнергетики,
Хэйлунцзянский университет,
г. Харбин, Китай,
daicahgnlei@126.com.

Changlei Dai,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Director,
School of Hydroelectric Power,
Heilongjiang University,
Harbin, China,
daicahgnlei@126.com.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 08.11.2022.

The article was submitted 14.07.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 08.11.2022.